

시간 기반의 운용환경을 고려한 장거리 레이더 M&S 도구 개발

Development of Modeling & Simulation Tool for Long Range Radar Considering Operational Environment in Time Domain

박명훈 · 김현승 · 전우중 · 유승기 · 권세웅 · 문현욱 · 이기원

Myung-Hoon Park · Hyun-Seung Kim · Woo-Joong Jeon · Seung-Ki You ·
Se-Woong Kwon · Hyun-Wook Moon · Ki-Won Lee

요 약

장거리레이더의 성능은 기상환경 및 지형뿐만 아니라, 레이더 시스템의 빔 운용에 따라 크게 영향을 받는다. 본 논문에서는 레이더 성능 예측을 위해 장거리레이더의 외부 환경 및 레이더 시스템을 반영한 M&S 도구 개발 내용과 검증 방법을 기술하였다. 이를 위해 APM을 적용하여 대기굴절 및 전파전파 특성을 모의하고, 빔 운용을 고려하기 위해 실제 레이더 장비에서 사용하는 빔 템플릿을 기반으로 모델링하였다. 개발한 M&S 도구를 3가지 시나리오를 통해 검증하였고, 모의 결과를 통해 기상환경 및 지형과 레이더 빔 운용성을 고려한 장거리레이더 성능 예측에 매우 효과적임을 확인하였다.

Abstract

The performance of long range radar is affected by the atmospheric conditions and terrain, as well as the beam operation of the radar system. In this paper, a modeling and simulation(M&S) tool was developed considering the external environment and radar systems of long range radars for performance prediction, and was described using the verification method. Atmospheric refraction and wave propagation were simulated using APM, to analyze the effects of the external environment. The beam template of radar, which is used for actual radar systems, was utilized to analyze the effects of beam operation. The developed M&S tool was verified by comparison with the experimental results obtained from three different situations and confirmed to be highly effective in predicting the performance of long range radar.

Key words: Modeling and Simulation, Radar Simulation, Radar Performance Prediction, Long Range Radar, APM

I. 서 론

현대전에서는 전장 환경의 범위가 넓어지고, 아군을 위협하는 무기체계가 점차 다양한 형태로 소형화/고속화 되고 있다. 이러한 변화에 감시정찰 체계의 중요성이 나 날이 증가하고 있으며, 이에 따라 레이더의 기술 또한 점

차 발전하는 추세이다^{[1][2]}.

레이더 요구 성능은 기술 발전과 더불어 대공 방어 및 표적의 종류와 탐지 범위가 증가함에 따라 고도화되고 있다. 이로 인해 장(長)거리 및 고(高)고도 탐지는 물론 탐지 조건을 만족하기 위한 다양한 빔 운용을 할 수 있는 위상배열 안테나를 사용한 레이더가 증가하는 추세이다.

LIG 넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received May 27, 2019 ; Revised July 10, 2019 ; Accepted July 17, 2019. (ID No. 20190527-053)

· Corresponding Author: Myung-Hoon Park (e-mail: myunghoon.park@lignex1.com)

레이다 개발에 있어 탐지 거리가 길고, 복잡한 빔 운용을 할수록 개발 단계에서 높은 신뢰성을 바탕으로 다양한 성능에 대한 사전분석이 요구된다. 사전분석은 개발 기간 및 비용, 설계오류 도출, 성능 예측 및 요구사항 만족 여부를 판단하기 위해 수행하는데, M&S를 통해 이러한 위험 요소들을 예측 및 분석할 수 있다.

본 논문에서 기술한 M&S 도구는 신뢰성을 위해 보편적으로 알려진 레이다 방정식 등의 수식을 이용하였으며, 체계 성능을 예측하고 분석하기 위해 개발되었다. 레이다 탐지 능력은 빔 패턴 및 빔 운용, 구동, 탐지 판단 알고리즘 등의 기술적 요소와 레이다 위치, 대기상태, 표적기동 등의 운용 환경에 따라 결정된다. 특히, 대기상태 및 지형은 레이다 성능에 있어 큰 손실을 유발하는 요소이다. 대표적으로 온도·습도에 따른 대기 굴절률, 다중 경로 손실, 사이트 인근 지형의 간섭에 따른 손실 등이 있는데, 이를 전파손실이라고 한다. 전파손실은 레이다가 운용되는 매 순간 변화하고, 레이다 주변 환경에 따라 그 값이 달라지며 거리가 멀어질수록 영향 요인이 누적되어 정확한 손실 값을 예측하기 어렵다. 이러한 이유로 기존의 유사 연구에서는 운용환경에 따른 전파손실을 고려하지 않거나 고정 값으로 대체하였다^{[3]~[5]}. 하지만 전파손실 값의 정확도는 레이다 성능 예측에 큰 영향을 미치므로 M&S 도구에 전파손실을 정확하게 반영하는 것은 매우 중요하다.

운용 환경을 반영한 전파손실을 계산하는 모델은 대표적으로 APM(Advanced Propagation Model)이 있다^{[6][7]}. 이 모델을 이용하여 레이다 위치의 대기상태 및 지형 정보와 대표적인 레이다 성능 제원 등에 따른 방위별 고각에 대한 손실 계산 결과를 얻을 수 있다. 하지만 계산된 손실 결과는 고정되어 있는 표적을 가정한 것으로 실제 표적의 비행 시나리오 및 레이다의 빔 스케줄링 등의 시간자원인 레이다 성능정보 반영에는 분명한 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 빔 스케줄링 등의 시간자원을 반영한 레이다 모델과 표적의 기동을 모사하는 표적모델을 구성하고, 대기환경 및 지형정보를 반영한 운용환경 모델과 통합하여 M&S 도구를 개발하였다. 이를 통해 시간 축에서 레이다 성능의 동적인 운용성능을 예측하고, 실제 레이다 측정 데이터를 이용하여 M&S 도구의 검증을 수행하였다.

II. 모델 구성

레이다는 회전하며 여러 가지 빔 패턴으로 신호를 송신하고, 반사되어 들어오는 신호를 처리하여 표적을 탐지하는 기능을 수행한다. 이때 표적은 표적기의 형상과 운동 특성에 따라 기동하게 되고, 레이다와 표적 사이에는 대기환경, 지형 등의 전파환경이 구성된다. M&S 도구는 이러한 복잡한 레이다 체계를 간략하게 표현함과 동시에 기능들을 유사하게 모사해야 한다. 레이다 운용개념을 기반으로 레이다 부체계 및 주변 전파 환경을 모의하기 위해 그림 1과 같이 M&S 모델을 구성하였다.

2-1 레이다 모델

본 논문에서 모의하는 레이다는 3차원 위상배열 안테나를 사용하는 레이다로 여러 펜슬 빔을 서로 다른 형태로 탐색 구역에 방사하여 표적을 탐지하는 장거리 레이다이다. 각 부체계의 세부내용은 아래와 같다.

2-1-1 빔 운용모델

다중 빔을 사용하는 레이다의 경우 서로 다른 방사 고각, 빔 폭, 펄스 수, 펄스 폭, 빔 방사 순서 등으로 빔을 설계할 수 있다. 이러한 빔 조합을 빔 템플릿이라 한다. 설계된 빔들은 방사 순서 및 고각 변경, 특수 목적을 가진 빔 추가/삭제 등을 통해 여러 빔 템플릿으로 설계할 수 있고, 레이다 운용 시 특정 목적 및 상황에 맞게 빔 템플

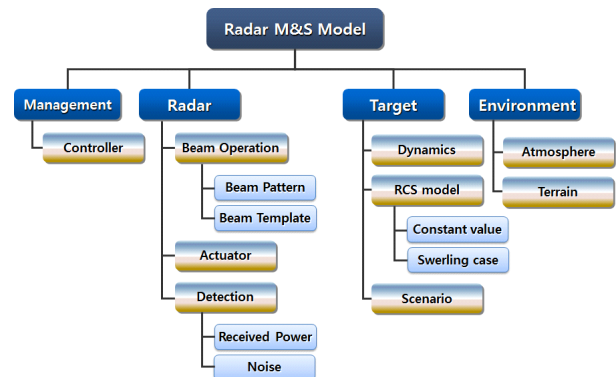
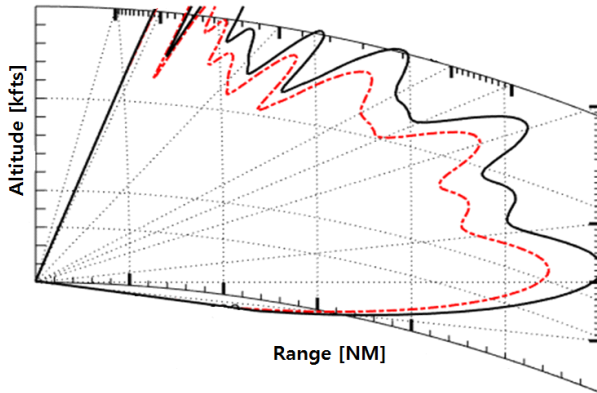
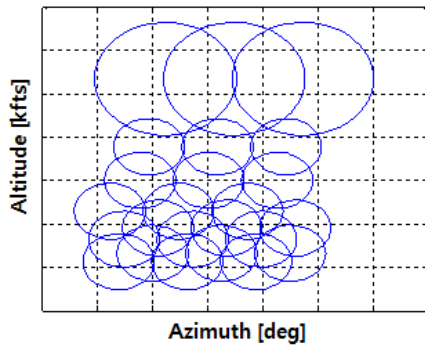


그림 1. M&S 모델 구성도

Fig. 1. The structure of M&S model.



(a) 고각
(a) Elevation



(b) 방위각
(b) Azimuth

그림 2. 빔 탐지 범위 결과
Fig. 2. Result of beam coverage.

릿을 사용할 수 있다,

그림 2는 고각 및 방위에 대한 탐지 범위를 레이더 설계 값 및 빔 운용을 반영하여 계산한 M&S 결과다. 탐지 범위 분석은 빔 템플릿 설계에 있어 매우 중요한 부분이며, 빈틈없이 모든 구역이 탐색되도록 설계되어야 한다. 그림 2(a)와 그림 2(b)는 이상적 운용환경에서의 탐지 범위로 빈 구간 없이 탐색 영역을 커버하는 것을 확인할 수 있다.

2-1-2 안테나 구동모델

모의하는 레이더의 경우 일정속도로 구동하며, 빔 방사 타이밍은 빔 템플릿에 따라 결정된다. 안테나 구동모

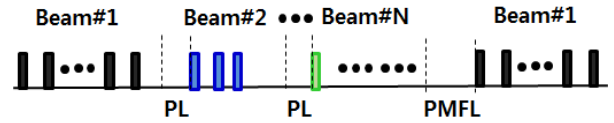


그림 3. 빔 방사 시간 개념
Fig. 3. The concept of beam scheduling.

델에서 빔의 운용을 고려하여 시뮬레이션의 시간 간격을 결정하게 된다. 그림 3과 같이 빔 별로 펄스 수 및 PRI (Pulse Repetition Interval)가 다르게 구성되어 있으며, 식 (1)에 따라 각 빔이 차지하는 시간이 계산된다. 추가적으로 빔 방사 후 빔 상태 및 간섭 등을 검사하는 시간 (passive listening: PL), 하나의 템플릿이 끝나면 장비를 점검하는 시간(performance monitoring fault location: PMFL)이 고려된다. 최종적으로 계산된 시간 간격은 식 (2)를 통해 각도로 환산되어 각 빔의 구동각도로 이용되고, 이는 곧 시뮬레이션 간격이 된다.

$$\Delta time = Pulse_Nm \times PRI + PL (+ PMFL) \quad (1)$$

$$\Delta deg = 360^\circ \times \Delta time \times \frac{RPM}{60} \quad (2)$$

2-1-3 탐지판단 모델

레이더 성능을 나타내는 지표는 일반적으로 식 (3)과 같이 레이더 방정식이 이용되며, 이 수식을 통해 표적 기동에 따라 수신되는 신호 크기를 계산할 수 있다^{[8],[9]}. 수식에 들어가는 레이더 설계 변수값은 운용되는 빔 템플릿의 각 빔별 성능 값이 이용되고, 빔마다 발생하는 서로 다른 손실들을 각각 계산하여 적용한다. 손실 계산은 식 (4)를 이용하며, 종류로는 고각 빔 조향에 따른 안테나 송수신의 이득 변화, 빔 폭 내의 표적 위치에 따른 손실 및 APM을 통한 운용환경에 따른 전파손실 등이 있다.

$$SNR = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \tau_p N_p \sigma_t}{(4\pi)^3 R^4 k T L_p L_{sys}} \right) \times G_{sp} \quad (3)$$

$$G_{sl} = G_{t,r} - G_{t,r} \times \cos(\theta)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

| | |
|---|-----------------------------------|
| P_t : 송신전력(W) | N_p : 펄스 수 |
| G_t : 송신이득(W/W) | σ_t : RCS(m ²) |
| G_r : 수신이득(W/W) | R : 표적 거리(m) |
| λ : 파장(m) | L_{sys} : 시스템손실(W/W) |
| τ_p : 펄스폭(sec) | L_p : 대기손실(W/W) |
| κ : Boltzman's constant [W/(Hz K)] | |
| T : 시스템 잡음 온도(K) | θ : 빔 조향 각도(deg) |
| G_{sp} : 신호처리 이득(W/W) | G_{sl} : 빔 조향 손실(W/W) |

잡음은 각 빔의 특성과 시스템 열잡음에 의한 크기만 고려하여 고정 값으로 적용하였다. 각 빔마다 계산한 표적의 수신 크기와 빔별로 계산된 거리별 임계값을 비교하여 탐지 여부를 판단한다.

2-2 표적 모델

항공기 운동을 모사하는 모델은 모의 수준에 따라 크게 3자유도 및 6자유도 운동방정식이 있다. 본 논문에서는 3자유도 운동방정식을 적용하여 표적기의 3축에 대한 병진운동만을 고려하였다.

2-2-1 표적기 운동 모델

NED 좌표계에서 3축에 대한 각각의 위치는 속도 및 자세로부터 적분하여 산출되고, 이는 뉴턴 제 2법칙인 $F = \sum ma$ 를 기반으로 3자유도 운동방정식을 세울 수 있다. 여기에서 가속도 명령은 항공기가 등속 직진 주행할 때는 0, 선회할 때는 선회반경과 속도에 의해 $\frac{V^2}{R}$ 으로 정의할 수 있다.

$$F_b = Ma_c \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos \gamma \cos \psi \\ V \cos \gamma \sin \psi \\ -V \sin \gamma \end{bmatrix}$$

$$\dot{V} = \frac{F_x}{M} \quad \dot{\gamma} = \frac{F_z}{M V} \quad \dot{\psi} = \frac{F_y}{M V \cos \gamma} \quad (6)$$

| | |
|------------------------|-------------------|
| γ : 비행 경로각(deg) | ψ : 방위각(deg) |
| V : 비행속도(m/sec) | [X,Y,Z]: 표적위치 |
| F : 힘(N) | M : 중량(kg) |

항공기 $i-1$ 번째 위치, 속도, 자세에 식 (6)과 같이 미분방정식을 적분하여 더함으로써 i 번째 위치에서의 운동 파라미터를 산출할 수 있다. 이 때 Runge-Kutta 4차 방식으로 적분하여 항공기 위치, 속도, 비행경로각, 방위각을 산출할 수 있다.

등속선회는 항공기가 힘의 균형을 이루며 일정한 속력, 고도, 선회반경을 유지하며 원운동을 하는 것이다.

$$n = \frac{L + T \sin(\alpha)}{W} = \frac{1}{\cos \phi}$$

$$R = \frac{V^2}{g \sqrt{n^2 - 1}} = \frac{V^2}{g \tan \phi}$$

$$a = \frac{V^2}{R} = g \tan \phi \quad (7)$$

| | |
|-----------------------------------|---------------------|
| n : 하중배수 | R : 선회반경(m) |
| a : 가속도 명령(m/sec ²) | ϕ : 선회각(deg) |
| L : 양력(N) | W : 표적중량(N) |
| T : 추력(N) | α : 받음각(deg) |

2-2-2 시나리오 모델

시나리오 모델은 초기 기동 조건 및 항공기 특성, 선회 조건 등을 관리하여 표적기의 기동을 통제한다. 기본적인 기동 종류로는 직진, 좌/우 선회, 고도 변경이 있다.

2-2-3 표적 RCS

표적의 RCS(Radar Cross Section)는 표적으로 입사되는 강도 대비 반사되어 레이다로 수신되는 강도의 비로 반사된 표적의 유효면적을 의미한다. 표적의 RCS는 외형 및 재질, 자세에 따라 변화폭이 매우 크다^[10]. 이러한 RCS 변화를 표현하는 대표적인 모델의 경우 표면이 복잡한 물체의 RCS 변화를 표현한 Swerling 모델이 있으며, 또한 표적의 기종에 따라 RCS 크기를 나타내는 대푯값(고정값)들이 존재한다.

2-3 운용 환경 모델

APM 모델을 통해 전파전파 특성을 계산하는데 활용되는 대기 상태의 경우 전파 굴절도의 정보가 필요하다. 전

과 굴절도(N)는 국내 7곳의 기상관측소에서 측정된 대기 압력 및 이슬점 온도, 섭씨온도 데이터를 기반으로 계산할 수 있으며, 시간 및 장소, 고도마다 다른 값을 가진다. 전파 굴절도는 식 (8)과 같이 압력, 온도, 수증기압을 통해 계산되며, 이를 이용해 일정 시간대별 측정위치의 대기 상태를 알 수 있다^[11].

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (8)$$

T : 온도(K) P : 압력(hPa) e : 수증기압(hPa)

계산된 전파 굴절도는 표 1과 같은 기준으로 대기상태 (standard, sub, super, normal, duct)를 구분하는데 사용된다. 그림 4와 같이 normal 대기를 기준으로 sub 대기의 경우 하위 굴절로 빔이 들리는 현상이 나타나며, super 및 duct 대기의 경우 초 굴절 상태로 빔이 지상으로 휘는 현상이 나타난다. 대기 상태가 sub일 경우 빔이 위로 들리기 때문에 클러터에 대한 영향은 감소하지만 최대 탐지 거리가 짧아지고, 탐지되는 빔이 기준보다 아래를 향하는 빔에 탐지되어 실제 고도보다 더 낮은 고도로 오차가 발생한다. 한편, 대기 상태가 super, duct일 경우 최대 탐지 거리는 길어지는 반면, 클러터의 영향이 커지고 더 높은 고

도로 오차가 발생한다. 공통적으로 normal 대기 기준으로 이상대기(sub, super, duct) 시 빔의 깨짐 현상이 심해지며, 레이다의 탐지성능에 큰 영향을 미치기 때문에 성능 시험 시 필히 고려해야 할 부분이다.

최종적으로 계산된 전파 굴절도는 APM에 의해서 지형 데이터와 연관되어 Propagation factor(F)를 계산하는데 사용된다. 이때 PE(Parabolic Equation) 모델 등 총 4종류의 APM 종속모델이 각각의 영역별로 선택되어 등방성 안테나 및 안테나 패턴에 따른 필드 크기를 이용하여 계산하게 된다. 레이다 방정식에 입력되는 전파손실(L_p)의 경우 식 (9) 및 식 (10)을 통해 계산된다^{[6],[7]}. 이때 계산된 전파손실은 단방향(1-way)으로 레이다의 운용 시간과 공간 및 빔 패턴이 고려된 손실이다.

$$F = \left| \frac{E}{E_0} \right| \quad (9)$$

$$L_p = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) - 20 \log(F) \quad (10)$$

E : 안테나 패턴이 포함된 수신점에서의 필드 크기

E_0 : 등방성 안테나 패턴 수신점에서의 필드 크기

λ : 파장(m) R : 표적거리(m)

2.4 모델 간 상호 연동

레이다 체계의 동작을 모의하는 시뮬레이션은 그림 5와 같이 크게 탐색과 탐지 모드 단계로 구분되고, 각 구성된 모델들의 기능에 따라 동작된다. 사용자가 초기 표적 시나리오 및 빔 템플릿, 레이다 정보를 입력하면 탐색모드가 시작된다. 먼저 구동모델이 각 빔마다 시간 간격을 계산하여 레이다를 구동하고, 그 정보를 표적모델 및 APM에 전달한다. 표적모델은 운동 방정식을 통해 제공된 시간 간격만큼 기동을 계산하고, APM은 빔 패턴 및 시간, 표적 위치 정보를 이용하여 운용환경을 반영한 전파손실을 계산한다. 레이다가 방위각으로 회전하면서 표적을 탐색하고, 상대 위치 계산을 통해 빔 폭 안에 표적이 들어오는지 판단하게 되고 인-빔 처리가 되면 탐지모드가 시작된다.

탐지판단 모델은 APM으로부터 전파손실 값을 전달받아 표적의 수신크기 및 잡음을 계산한다. 이때 레이다의 구동 및 표적의 기동이 고려되고, 하나의 표적에 대해 다

표 1. 전파 굴절도 및 대기 상태

Table 1. Refractive gradients and conditions.

| Atmosphere condition | N-gradient | Atmosphere condition | N-gradient |
|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| Duct (trapping) | < -157 N/km | Normal | $-79 \sim 0$ N/km |
| Super | $-157 \sim -79$ N/km | Sub | > 0 N/km |
| Standard | -39 N/km | | |

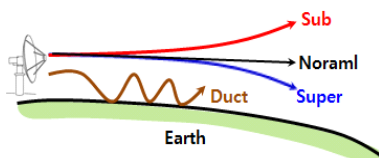


그림 4. 대기 상태에 따른 전파전파 개요

Fig. 4. The concept of wave propagation by atmosphere condition.

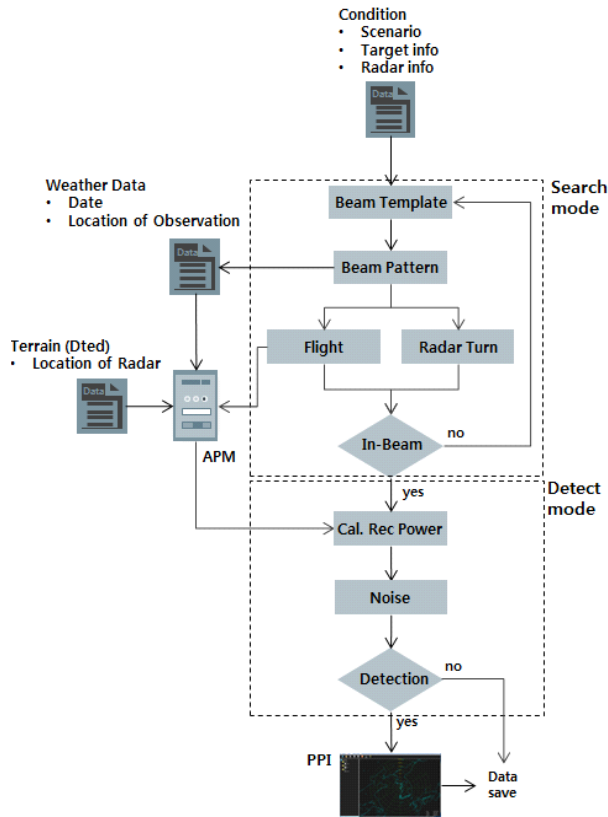


그림 5. M&S 모델 흐름도

Fig. 5. The flow diagram of M&S model.

수의 빔들에 대한 수신 정보(다수의 수신 크기)가 계산되게 된다. 계산된 수신 크기들은 각각의 임계값과 비교되어 임계값보다 더 큰 수신 크기에 해당되는 모든 데이터들이 임시저장 공간에 저장된다. 레이더 1회전이 종료되면 저장된 데이터 중 수신 크기가 가장 큰 신호에 대한 정보가 최종 메모리에 저장되고, PPI(Plan Position Indicator) 화면에 전시되며, 이를 포착으로 간주한다. 만일 수신 크기가 임계값을 넘지 못하면 불포착으로 판단하며, 시나리오 종료까지의 레이더 총 회전수와 포착된 레이더 회전수의 비율을 통해 최종 포착률을 계산한다.

III. M&S 결과 및 성능 검증

3-1 시나리오

본 논문에서는 레이더 성능 비교 및 M&S 도구 검증을

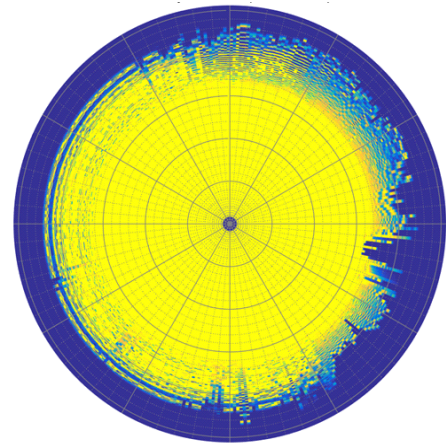


그림 6. 전 방위 전파 분포

Fig. 6. Power flux density as per azimuth.

위하여 실제 레이더 사이트의 실측 데이터를 이용하여 모의 결과와 비교 검증하였다. 시나리오 선정 시 그림 6과 같이 레이더의 요구 성능을 만족하는 운용환경을 고려하였다.

그림 7은 분석 대상 시나리오의 개략도이다. 시나리오 1은 한반도 북동쪽 방향으로 퇴각 중 우측으로 한번 선회하고, 시나리오 2와 시나리오 3은 북동쪽에서 진입 및 퇴각하는 기동이다. 시험 시나리오를 모사하기 위하여 기동

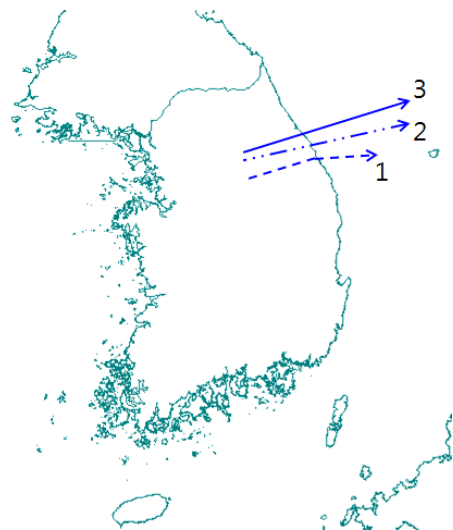


그림 7. 기동 시나리오 개요

Fig. 7. The concept of flight scenario.

표 2. M&S모델 시나리오 요약

Table 2. Summary of M&S model scenario.

| | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 |
|---------------|------------------|------------------|------------------|
| Altitude [ft] | 20,000 | 40,000 | 30,000 |
| Speed [m/s] | 180 | 180 | 180 |
| Direction | Northeast → East | Northeast | Northeast |
| Type | 2 m ² | 3 m ² | 2 m ² |
| Atmosphere | Super | Super | Super |
| Beam template | Template A | Template A | Template B (New) |

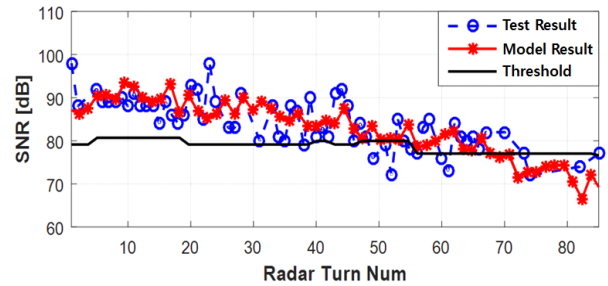
모델을 표 2와 같이 설정하였다.

빔 템플릿 및 레이다 성능변수 값은 실제 레이다 장비의 설계 내용을 반영하였다. 레이다 성능에 대한 내용은 보안상 생략한다. 대기 전파환경 모델의 경우 실제 레이다 위치를 반영한 지형정보 DTED(Digital Terrain Elevation Data) 및 가장 가깝게 위치한 기상 관측대의 데이터를 이용하였고, 측정 시간의 경우 하루 총 4회의 관측 데이터 중 시험 시간과 가장 가까운 시간대의 데이터를 활용하여 설정하였다.

3-2 M&S 모델 검증 및 분석

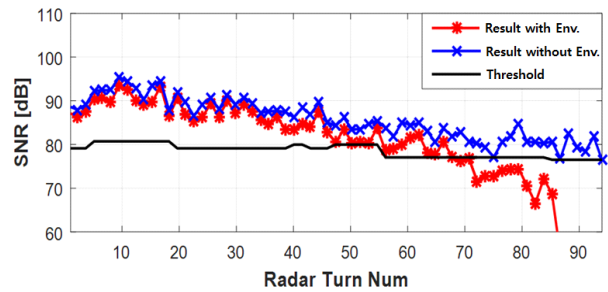
그림 8 및 그림 9는 3-1에서 설정한 시나리오 1과 시나리오 2에 대한 레이다 성능 분석 결과이다. 각 그림 (a)는 레이다 회전에 따른 탐지성능 변화를 나타낸 것이다. 실측 데이터는 표적이 탐지된 경우에만 저장되며, 이는 표적에 반사되어 레이다에 수신된 신호크기를 의미한다. 모델 결과의 경우 이론상 계산된 수신 크기와 임계값을 나타낸다.

실측 및 모의 결과를 비교하였을 때 수신 신호 크기의 편차가 다소 다른 점을 보인다. 이는 클러터 및 RCS의 변화에 따른 차이이다. 실측에서 나타나는 클러터는 매우 임의적으로 나타나며, 실제 항공기의 운동 특성에 따라 발생하는 RCS 크기의 변화 역시 임의적이기 때문에 모사하기 어렵다. 본 논문에서는 대기 및 지형에 따른 전파전파 특성을 우선적으로 고려하기 위해 클러터 및 RCS 변수를 고정 값으로 간소화했다. 그 결과, 전체적인 표적 수신 크기의 경향성과 불 포착 구간이 유사한 것을 볼 수 있다.



(a) 시험 및 모의 결과

(a) Result of simulation and test result



(b) 운용환경에 따른 모의 결과

(b) Result of simulation according to operation environment

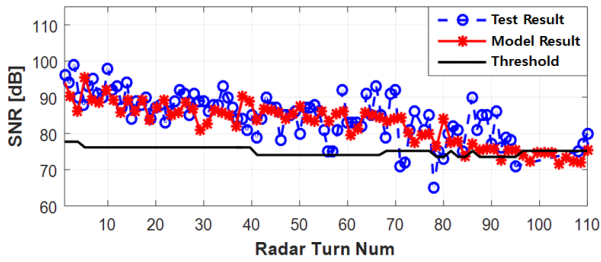
그림 8. 시나리오 1 탐지 성능 결과

Fig. 8. Result of detection performance scenario 1.

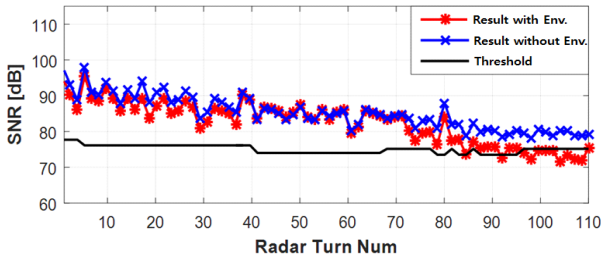
그림 (b)는 운용환경을 반영 여부에 따른 모의 결과 비교이다. 기존 모의 결과로 부터 운용환경(대기, 지형)에 따른 전파 손실을 제거하고, 기상적인 전파손실만을 고려하였으며, 그 밖에 변수는 동일하게 적용하였다. 그 결과, 그림과 같이 원거리에서 지형에 의한 불 포착 구간이 모의가 안 되어 기존 모의 결과와 큰 차이를 보였다.

그림 10의 결과는 시나리오 3의 빔 템플릿B 적용 결과이다. 이 템플릿은 특정 탐색 구간에 좀 더 많은 시간 자원을 할당하여 장거리 탐지에 유리하도록 설계되었다. 그 결과, 중거리에서 실제와 다른 번호의 빔에 표적이 포착되었다. 이에 따라 모의 결과와 실제에서 적용되는 수신 크기 및 임계값 계산 차이로 수신 신호 크기가 다소 낮은 모의 결과를 가진다. 하지만 원거리에서 템플릿에 따른 변경된 시험 결과와 모의 결과가 유사한 것을 볼 수 있다.

3가지 시나리오 모두 실측과 모의 결과가 유사한 것을 볼 수 있으며, 운용환경 반영 여부에 따른 결과 비교를 통해 운용환경 반영의 필요성을 보여주었다.



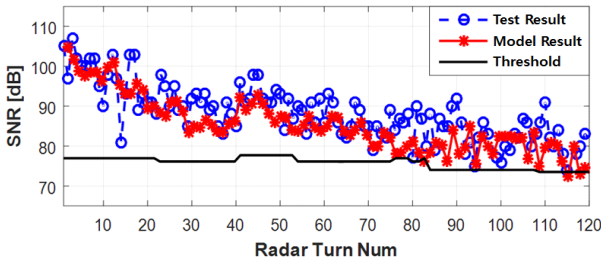
(a) 시험 및 모의 결과
(a) Result of simulation and test result



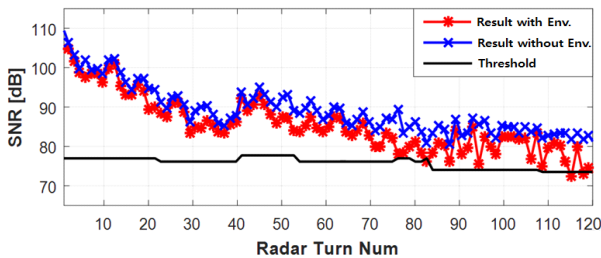
(b) 운용환경에 따른 모의 결과
(b) Result of simulation according to operation environment

그림 9. 시나리오 2 탐지 성능 결과

Fig. 9. Result of detection performance scenario 2.



(a) 시험 및 모의 결과
(a) Result of simulation and test result



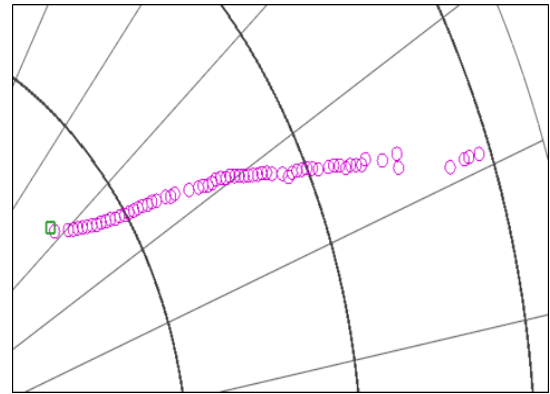
(b) 운용환경에 따른 모의 결과
(b) Result of simulation according to operation environment

그림 10. 시나리오 3 탐지 성능 결과

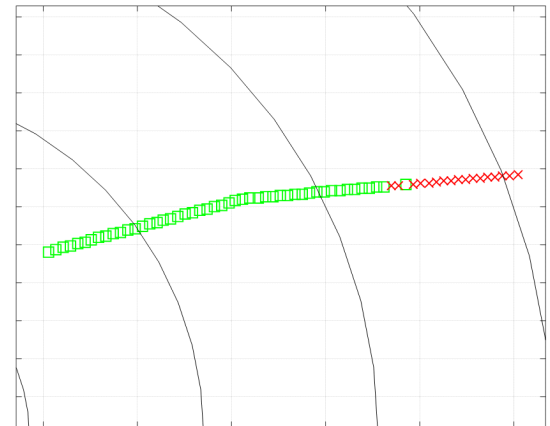
Fig. 10. Result of detection performance scenario 3.

그림 11~그림 13은 각 시나리오에 대한 포착도 결과이다. 시험 데이터는 표적을 포착하지 못하면 데이터를 저장하지 못해 결과에 나타나지 않는다. 모의 결과의 경우 그림 8~그림 10에서 보여준 수신 크기 및 임계값을 통해 탐지 판단된 여부를 보여준다.

시나리오 1의 경우, 그림 11과 같이 선화 후 원거리에서 지형에 의한 탐지성능이 저하되어 시험 및 모의 결과 모두 불 포착 구간이 발생한 것을 볼 수 있다. 다만 시험 결과에서 최대탐지 부분의 표적이 포착된 것을 볼 수 있다. 이는 표적 선화 시 RCS 변화에 따른 수신크기 변화에 의한 결과로 분석되며, 모의에서는 RCS가 고정이기 때문에



(a) 시험 결과
(a) Test result



(b) 모의결과
(b) Simulation result

그림 11. 포착 결과 시나리오 1

Fig. 11. Result of detection scenario 1.

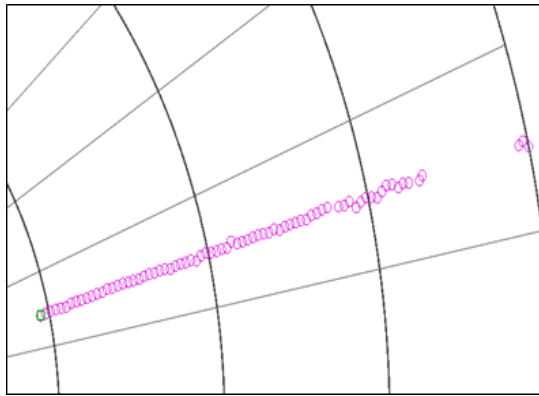
이러한 현상은 나타나지 않았다.

시나리오 2 또한 그림 12와 같이 시험결과와 유사한 모의결과를 가진다. 두 결과 모두 동일하게 지형 및 대기에 의한 전파손실로 원거리에서 탐지능력이 저하되어 포착하지 못하다가 최대 탐지 거리에서 최종적으로 다시 표적을 탐지한 것을 볼 수 있다.

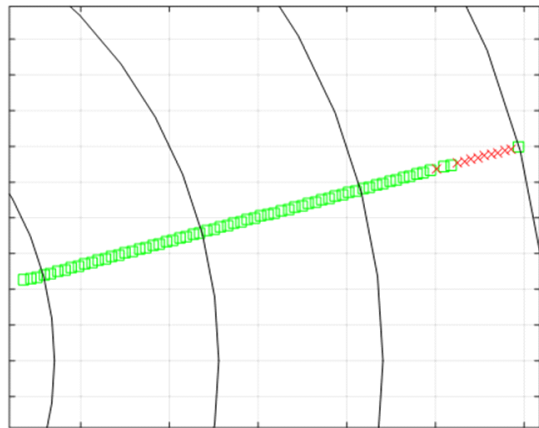
시나리오 3의 경우, 또한 그림 13과 같이 시험 및 모의 포착도 결과가 유사하며, 중거리 근방에서 1회 불 포착된 현상이 나타났다. 이는 그림 10(a)의 레이더 80회전 근방에서 해당 빔의 임계값이 높게 잡혀 마진이 부족하여 발생한 현상이다.

그림 14는 시나리오3의 원거리 탐지능력 향상을 위해 상향 빔(근거리)을 줄이고, 하향 빔(원거리)을 추가하여 조정된 변경된 템플릿 B에 따른 탐지 결과이다. 그 결과, 그림 14와 같이 원거리에서 기존 빔 템플릿 대비 수정된 템플릿의 수신세기가 큰 것을 볼 수 있다.

레이더 성능 판단에 사용되는 지표로는 최대 탐지거리, 고도, 분해능, 탐지확률(Pd), 오탐지율(Pfa) 등이 있지만, 본 논문에서는 포착률로 적용하였다. 앞서 언급하였듯 포착률은 정해진 탐지 범위, 표적 기동 동안 레이더의 총 회전수 대비 포착된 회전수의 비율로 계산한다. 임계값의 경우 $P_{fa} = 10^{-0}$, 탐지확률 00 %를 기준으로 빔 특성과



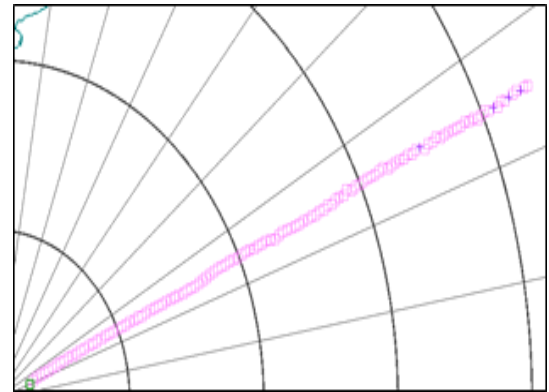
(a) 시험 결과
(a) Test result



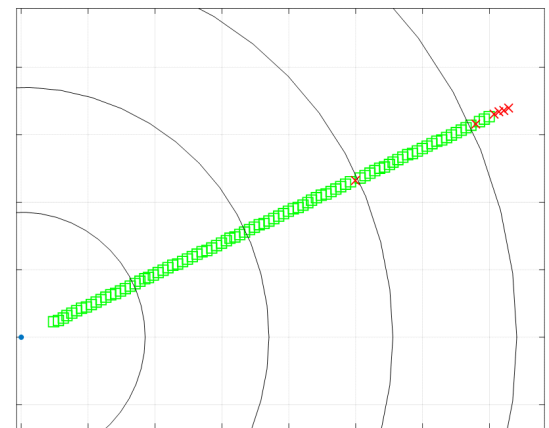
(b) 모의결과
(b) Simulation result

그림 12. 포착 결과 시나리오 2

Fig. 12. Result of detection scenario 2.



(a) 시험 결과
(a) Test result



(b) 모의결과
(b) Simulation result

그림 13. 포착 결과 시나리오 3

Fig. 13. Result of detection scenario 3.

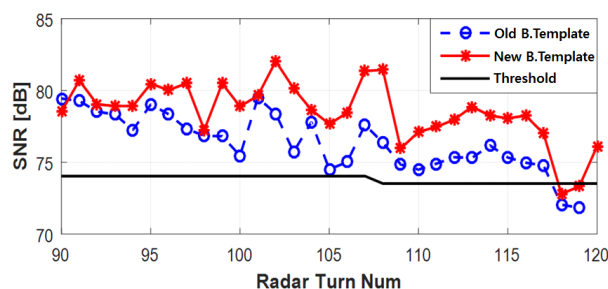


그림 14. 시나리오 3 탐지 성능 결과(빔 템플릿 B)

Fig. 14. Result of detection performance scenario 3(Beam template B).

표 3. 포착률 결과

Table 3. Result of detection rate.

| Scenario | Detection rate [%] | | |
|----------|--------------------|-------------------|---------------------|
| | Test result | Simulation result | |
| | | With environment | Without environment |
| 1 | 76.67 | 77.97 | 100 |
| 2 | 87.27 | 87.03 | 100 |
| 3 | 98.8 | 99.11 | 100 |

거리 요소를 반영하여 설정하였고, 그 결과는 표 3과 같다. 3가지 시나리오 모두 운용환경을 반영한 모의결과와 시험결과가 유사한 포착률을 가지며, 운용환경 미반영 시 포착률이 모두 100 %인 것을 볼 수 있다. 따라서 실 레이더 체계의 성능을 분석하는 M&S 도구에는 운용 환경이 필요 고려돼야 하는 것을 확인할 수 있다. 또한 시나리오 3의 경우 기존 템플릿(template A)을 사용했을 경우 94.23 %로 변경된 템플릿(template B)의 포착률(99.11 %)이 약 5 % 향상된 것을 볼 수 있다. 이처럼 M&S를 활용하여 레이더 체계 설계 시 설계 사양에 따른 성능 변동성을 확인하고 사전에 분석할 수 있다.

IV. 결 론

고(高)성능 레이더의 개발 단계는 복잡하고 많은 위험 요소가 존재하여 성능을 예측하고 위험요소를 제거하는 단계가 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 실제 레이더 기능을 모사하기 위해 레이더 및 표적, 환경 모델을 구성

하고, 이를 통합하여 M&S 도구를 개발하였다. 개발된 모델은 빔 템플릿 및 운용환경(위치 및 대기)과 같은 시간적이고 공간적인 요소를 동시에 고려할 수 있다. M&S 모델검증을 위해 시험 비행의 실측 데이터와 비교하였고, 모의결과 탐지성능 변화 및 원거리에서의 미 탐지 구간이 시험 결과와 유사한 것을 볼 수 있다. 포착률의 경우, 시나리오 1의 경우 시험 및 모의 결과 각각 76.67 %, 77.97 %, 시나리오 2의 경우 87.27 %, 87.03 %, 시나리오 3의 경우 98.8 %, 99.11 %로 유사한 결과를 보여주었으며, 운용환경을 반영하지 않을 시 포착률과 비교하여 운용 환경을 반영한 모의의 필요성을 확인하였다. 또한 빔 템플릿 변경에 따른 탐지성능 및 포착률 변화 비교를 통해 M&S 모델의 활용성도 확인하였다.

개발된 M&S 모델을 통해 레이더 개발 전 성능을 예측하여 개발 시간, 비용, 오개발 등의 위험요소를 줄일 수 있으며, 개발 후 레이더의 성능 저하에 대한 분석이 가능하다. 또한 설계 변경 및 레이더 운용환경(위치) 변화에 따른 탐지 성능을 예측하는데 활용할 수 있다. 추후 상세한 클러스터 및 RCS 모델 등을 개발하여 적용하면 운용 시 발생 가능한 성능 변화를 보다 상세히 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Y. H. Lee, "Radar's role and development prospects," *The Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 8, no. 1, pp. 2-28, Mar. 1997.
- [2] M. Skolnik, "Radar in the twentieth century," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 15, no. 10, pp. 27-46, Oct. 2000.
- [3] I. S. Jeon, H. S. Yoo, and S. T. Chung, "Performance analysis and improvement of TWTA for surveillance radar using modeling & simulation," *Journal of KIIT*, vol. 14, no. 4, pp. 25-35, Apr. 2016.
- [4] Y. H. Kim, W. J. Kim, K. H. Song, D. W. Lee, and H. N. Kim, "Modeling of received radar signals for scan pattern analysis," *Journal of the Institute of Electronics*

Engineers of Korea TC, vol. 47, no. 4, pp. 73-85, Apr. 2010.

- [5] E. P. Lam, H. W. Birrell, and J. Magallon, "Performance prediction of firefinder radar using high fidelity simulation," in *2010 IEEE Radar Conference*, Washington, DC, 2010, pp. 48-53.
- [6] A. E. Barrios, W. L. Patterson, "Advanced Propagation Model(APM) Ver. 1.3.1 Computer Software Configuration Item (CSCI) Documents," *Space and Naval Warfare Systems Center*, San Diego, CA, Tech. Doc. 3145, Aug. 2002.
- [7] A. E. Barrios, "Considerations in the development of the advanced propagation model(APM) for U.S Navy applications," in *2003 Proceedings of the International Conference on Radar*, Adelaide, SA, 2003, pp. 77-82.
- [8] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2008.

- [9] W. H. Yang, *Modelling and Simulation of Radar Systems*, Xi'an, Publishing House of Xidian University, pp. 1-3, 249-251, 258-260, 2007.
- [10] S. L. Johnston, "Target fluctuation models for radar system design and performance analysis: An overview of three papers," *IEEE Transactions on Aerospace And Electronic Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 696-697, Apr. 1997.
- [11] H. W. Moon, M. H. Jeon, W. J. Kim, S. K. Oh, J. H. Lee, and S. W. Kwon, et al., "Development of exponential model of Korea for improved altitude estimation performance of high-altitude target at radar system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 7, pp. 831-839, Jul. 2012.

박 명 훈 [LIG넥스원/선임연구원]

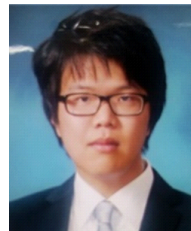
<https://orcid.org/0000-0002-5217-0365>



2014년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
 2016년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)
 2016년 1월~현재: LIG넥스원 SW연구소 선임연구원
 [주 관심분야] 레이더, M&S, 안테나 등

전 우 중 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3974-0631>



2010년 7월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 2016년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 2016년 1월~현재: LIG넥스원 SW연구소 선임연구원
 [주 관심분야] M&S, 레이더, 제어 등

김 현 승 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4021-5914>



2014년 2월: 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
 2016년 2월: 인하대학교 항공우주공학과 (공학석사)
 2016년 1월~현재: LIG넥스원 SW연구소 선임연구원
 [주 관심분야] 항공제어, M&S, 추적 알고리즘 등

유 승 기 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3473-7994>



2002년 2월: 한양대학교 지구해양과학 (이학사)
 2004년 8월: 한양대학교 해양환경과학 (이학석사)
 2013년 8월: 한양대학교 해양융합과학 (이학박사)
 2010년 1월~현재: LIG넥스원 SW연구소 수석연구원

[주 관심분야] 수중음향, M&S, 레이더 등

권 세 응 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8959-4452>



1999년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
2002년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2009년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2009년 7월~현재: LIG넥스원 레이더연구

소 수석연구원
[주 관심분야] 능동위상배열레이다, 전파전파 등

이 기 원 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2545-7579>



2000년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
2002년 8월: 충남대학교 전기공학과 (공학석사)
2002년 7월~현재: LIG 넥스원 레이더연구
소 수석연구원
[주 관심분야] 레이더 체계설계, 안테나,

신호처리 등

문 현 옥 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1298-2895>



2005년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2016년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2014년 3월~현재: LIG넥스원 레이더연구

소 수석연구원
[주 관심분야] 레이더 성능분석, 전파 전파, 무선채널 등